

УДК 551.521.3

Численное моделирование углового распределения яркости рассеянного солнечного излучения в земной атмосфере

В.П. Галилейский, А.И. Гришин, А.М. Морозов*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 8.05.2013 г.

Представлена вычислительная модель расчета поля яркости неба, вызванного однократно рассеянным в атмосфере солнечным излучением в видимом диапазоне спектра. В рамках численного моделирования принята модель послойно однородной атмосферы с высотным распределением коэффициентов молекулярного и аэрозольного рассеяния и поглощения. Расчеты производятся в трех спектральных диапазонах R, G, B, сопоставимых со зрением человека и фоторегистрацией.

Ключевые слова: поле яркости неба, земная атмосфера, рассеяние в атмосфере, численное моделирование; field brightness of the sky, the Earth's atmosphere, scattering in the atmosphere, numerical simulation.

В последнее время большое внимание уделяется численному моделированию углового распределения яркости рассеянного солнечного излучения в земной атмосфере [1, 2] для понимания процессов переноса солнечного излучения в атмосфере и оценки вклада тех или иных атмосферных оптических компонент в спектральную и угловую структуру поля яркости неба. Выявленные закономерности [1, 2] способствуют разработке методов определения и контроля оптических характеристик земной атмосферы.

В настоящей статье рассматривается вычислительная модель расчета поля яркости неба, обусловленной однократно рассеянным в атмосфере солнечным излучением. В рамках численного моделирования нами принята модель послойно-однородной атмосферы с высотным распределением коэффициентов молекулярного и аэрозольного рассеяния и поглощения. Ранее в работе [3] авторами уже рассматривался метод расчета яркости неба основанный на приближении однократного рассеяния монохроматического излучения в сферической однородной атмосфере, высота которой равна высоте однородной атмосферы H_0 для молекулярного рассеяния. Работы модели однородной атмосферы не позволили получить численные результаты, адекватные результатам наблюдений яркости неба (в особенности для больших зенитных углов). Кроме того, «тонкая» однородная атмосфера ограничивала возможности моделирования различных ситуаций, таких как влияние аэрозольного слоя, сумеречные процессы, неоднородность освещенности атмосферы во время солнечных затмений, положение наблюдателя над поверхностью Земли.

В новой реализации вычислительной модели формирования поля яркости неба принята послойно-однородная сферическая атмосфера, оптико-физические характеристики которой описываются молекулярным и аэрозольным рассеянием и молекулярным поглощением. Учитываются такие факторы, как спектральное распределение энергии солнечного излучения, высота земной атмосферы, высота точки наблюдения над поверхностью Земли.

Рассмотрим сферическую послойно-однородную модель атмосферы, на верхнюю границу которой падает направленный солнечный световой поток спектральной интенсивностью I_\odot . Относительно наблюдателя O направление светового потока \mathbf{n}_\odot определено азимутом A_\odot и зенитным расстоянием Z_\odot . Аналогично определяется направление визирования \mathbf{n}_V на точку небесной полусферы: A_V, Z_V . Яркость неба в направлении визирования \mathbf{n}_V формируется за счет рассеяния падающего солнечного излучения в воздушной среде на пути OL_T (рис. 1, цв. вклейка).

Точка L_T соответствует верхней границе атмосферы, а точка O — положению наблюдателя над поверхностью Земли, L_1 — путь в атмосфере солнечного излучения до элементарного (однородного) рассеивающего объема в точке l_V и соответственно L_2 от точки рассеяния до наблюдателя.

В рамках этой модели спектральная яркость фона неба $B(\mathbf{n}_\odot, \mathbf{n}_V)$ в направлении \mathbf{n}_V при положении Солнца \mathbf{n}_\odot запишется в виде

$$B(\mathbf{n}_\odot, \mathbf{n}_V) = I_\odot \int_0^{L_T} P_{L_1} \sum_{i=0}^m [\alpha_i(l_V) g_i(\gamma)] P_{L_2} dl_V, \quad (1)$$

где I_\odot — внеатмосферная спектральная интенсивность излучения Солнца на длине волны λ ; l_V — расстояние элементарного рассеивающего объема от

* Виктор Петрович Галилейский (gvp@iao.ru); Анатолий Иванович Гришин (aig@iao.ru); Александр Михайлович Морозов (moroz@iao.ru).

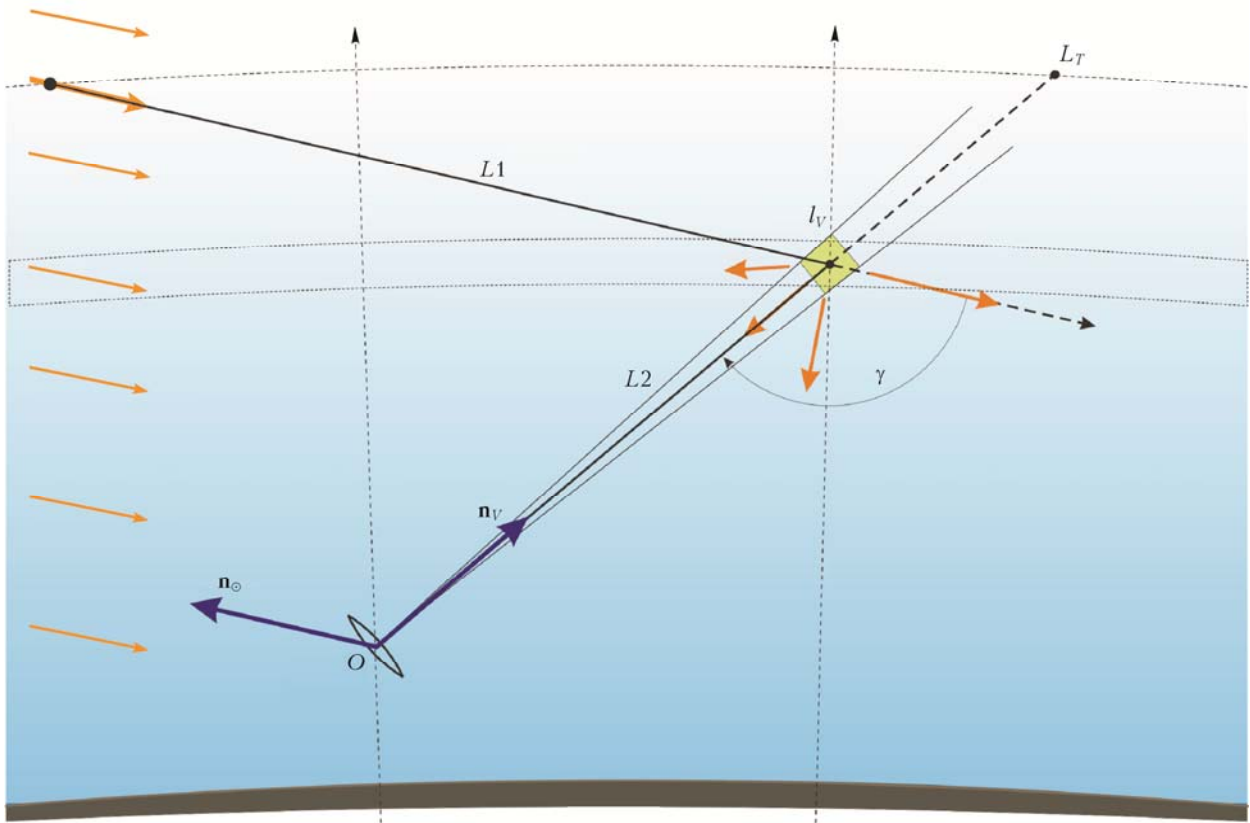


Рис. 1. Схема формирования поля яркости неба

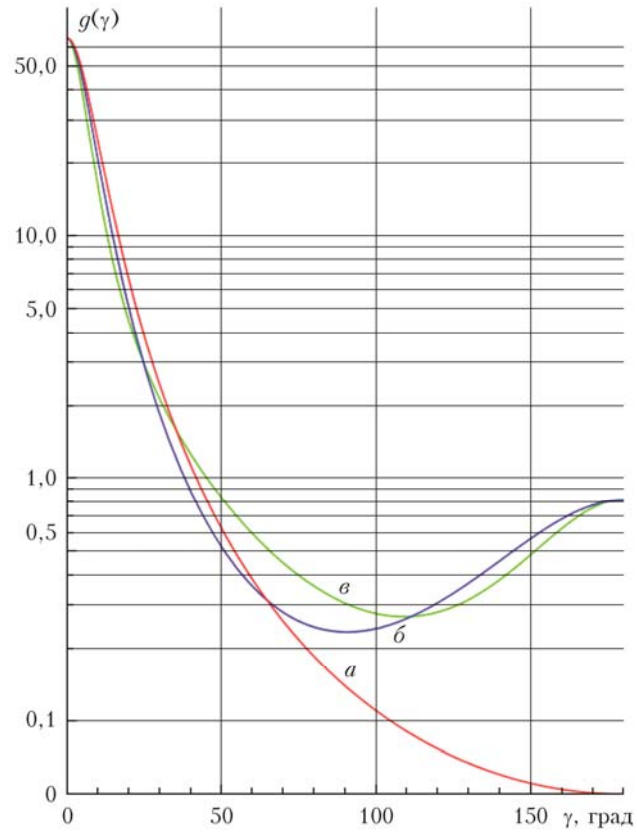


Рис. 2. Вид индикатрис рассеяния на основе формулы Хеньи–Гринштейна: $a - p = 0,8327$; $b - a = 0,8, p_1 = 0,8496, p_2 = -0,4$; $v - a = 0,88, b = 0,6, p_1 = 0,875, p_2 = -0,5, p_3 = 0,5$

наблюдателя в направлении визирования; $\alpha_i(l_V)$ – компоненты атмосферного рассеяния на длине волны λ ; $i = 0$ – молекулярное рассеяние, $i = 1...m$ – аэрозольное рассеяние; $g_i(\gamma)$ – индикатрисы соответствующих компонент рассеяния, не зависящие от высоты; P_{L1}, P_{L2} – коэффициенты пропускания атмосферы соответственно на участке $L1$ до точки рассеяния и $L2$ от точки рассеяния до наблюдателя.

Коэффициенты пропускания P_{L1}, P_{L2} излучения определяются по формуле

$$P_L = \exp\left(-\int_0^L (\alpha_\Sigma(l) + \beta_\Sigma(l)) dl\right), \quad (2)$$

где $\alpha_\Sigma, \beta_\Sigma$ – суммарные коэффициенты рассеяния и поглощения излучения в точке l на атмосферных участках.

Высотный профиль молекулярного рассеяния задается экспоненциальной зависимостью [4–6]:

$$\alpha(h) = \alpha_0 e^{-h/H_0} \quad (3)$$

($H_0 \cong 8$ км). Спектральная зависимость рассеяния рассчитывается по формуле

$$\alpha(\lambda) = \alpha_0 (\lambda/\lambda_0)^{-\nu}. \quad (4)$$

Здесь α_0 – приземное значение коэффициента молекулярного рассеяния на длине волны λ_0 , $\nu = 4$. Индикатриса молекулярного рассеяния

$$g_0(\gamma) = 0,7629 + 0,7113 \cos^2 \gamma. \quad (5)$$

Распределение по высоте компонент аэрозольного рассеяния $\alpha_i(h)$ задается как таблично, так и аналитически, включая экспоненциальную зависимость вида (3) с соответствующим значением высоты однородной атмосферы H_0 . Спектральная зависимость объемного коэффициента аэрозольного рассеяния $\alpha_i(\lambda)$ определяется формулой (4) с соответствующим значением ν [5, 7, 8].

Для аппроксимации индикатрисы аэрозольного рассеяния применяется формула Хенни–Гринштейна [4]:

$$HG(\gamma) = \frac{1 - p^2}{(1 - 2p \cos \gamma + p^2)^{3/2}}. \quad (6a)$$

Значение этой функции с увеличением угла γ монотонно убывает и принимает минимальное значение при 180° (рис. 2, кривая a , цв. вклейка). С другой стороны, известно, что для малых частиц индикатриса рассеяния близка к рэлеевской и имеет значительное обратное рассеяние с максимумом при угле 180° , которое не отражается этой формулой. Чтобы обеспечить аналитическую запись индикатрисы для полного диапазона углов рассеяния, предлагается использовать композиционные формулы

$$g(\gamma) = aHG(\gamma, p_1) + (1 - a)HG(\gamma, p_2) \quad (6б)$$

или

1006

$$g(\gamma) = abHG(\gamma, p_1) + (1 - a)HG(\gamma, p_2) + a(1 - b)HG(\gamma, p_3), \quad (6в)$$

где p_i – параметры асимметрии, определяющие степень вытянутости индикатрисы; при рассеянии вперед $0 \leq p_1 \leq 1$ и при обратном рассеянии $-1 \leq p_2 < 0$. Параметр a фиксирует баланс между рассеянием «вперед» и «назад», т.е. степень влияния p_1 и p_2 в формулах (6б) и (6в). Дополнительный третий член (6в) добавлен, чтобы усилить долю рассеяния для средних углов (рис. 2, кривая $в$, цв. вклейка). Параметры a, b могут принимать значения в интервале от 0 до 1. На рис. 2 (см. цв. вклейку) приведены индикатрисы, рассчитанные по формулам (6а)–(6в). Все приведенные формулы индикатрис удовлетворяют условию [4, 5]:

$$\frac{1}{2} \int_0^\pi \sin \gamma g(\gamma) d\gamma = 1.$$

Данные спектральной интенсивности входящего в атмосферу солнечного излучения I_\odot были заимствованы из [9, 10]. Источники содержат данные о спектральной интенсивности солнечного излучения на верхней границе земной атмосферы в спектральном интервале от 200 до 2495 нм с шагом 5 нм. Интенсивность излучения представлена в Вт · м⁻² · нм⁻¹.

Чтобы обеспечить возможность сопоставления результатов моделирования с фотографическими наблюдениями яркости неба, расчеты проводились в трех спектральных диапазонах, соответствующих цветовым каналам R, G, B (420, 520 и 600 нм). На рис. 3 (цв. вклейка) представлены результаты численного моделирования поля яркости неба для наблюдателя на высоте 2 км при зенитном положении Солнца $Z_\odot = 45^\circ$. Расчеты проведены для трех оптических моделей атмосферы с экспоненциальным распределением плотности на высоте [6, 7], задаваемых приземным значением объемного коэффициента рассеяния α_0 и шкалой высот H_0 . Модели различаются количеством рассеивающих компонент: a – чисто молекулярная атмосфера, b – атмосфера, включающая мелкодисперсную фракцию, $в$ – атмосфера, включающая мелкодисперсную и крупнодисперсную фракции. Значения параметров моделей аэрозольного рассеяния подбирались для большего соответствия фотографическим наблюдениям яркости неба.

Численное моделирование проводилось в широких пределах значений оптико-физических параметров молекулярного и аэрозольного рассеяния света в атмосфере при различных угловых положениях Солнца относительно горизонта. В целом результаты моделирования показывают удовлетворительное согласие с реальными фотографическими наблюдениями яркости неба. «Реакция» модели на изменение параметров аэрозольного рассеяния, положения Солнца над горизонтом или наблюдателя над поверхностью Земли по качественным признакам хорошо согласуется с практическим опытом наблюдений.

На рис. 3, $з$ (см. цв. вклейку) представлено изображение реального неба, полученное в горах на вы-

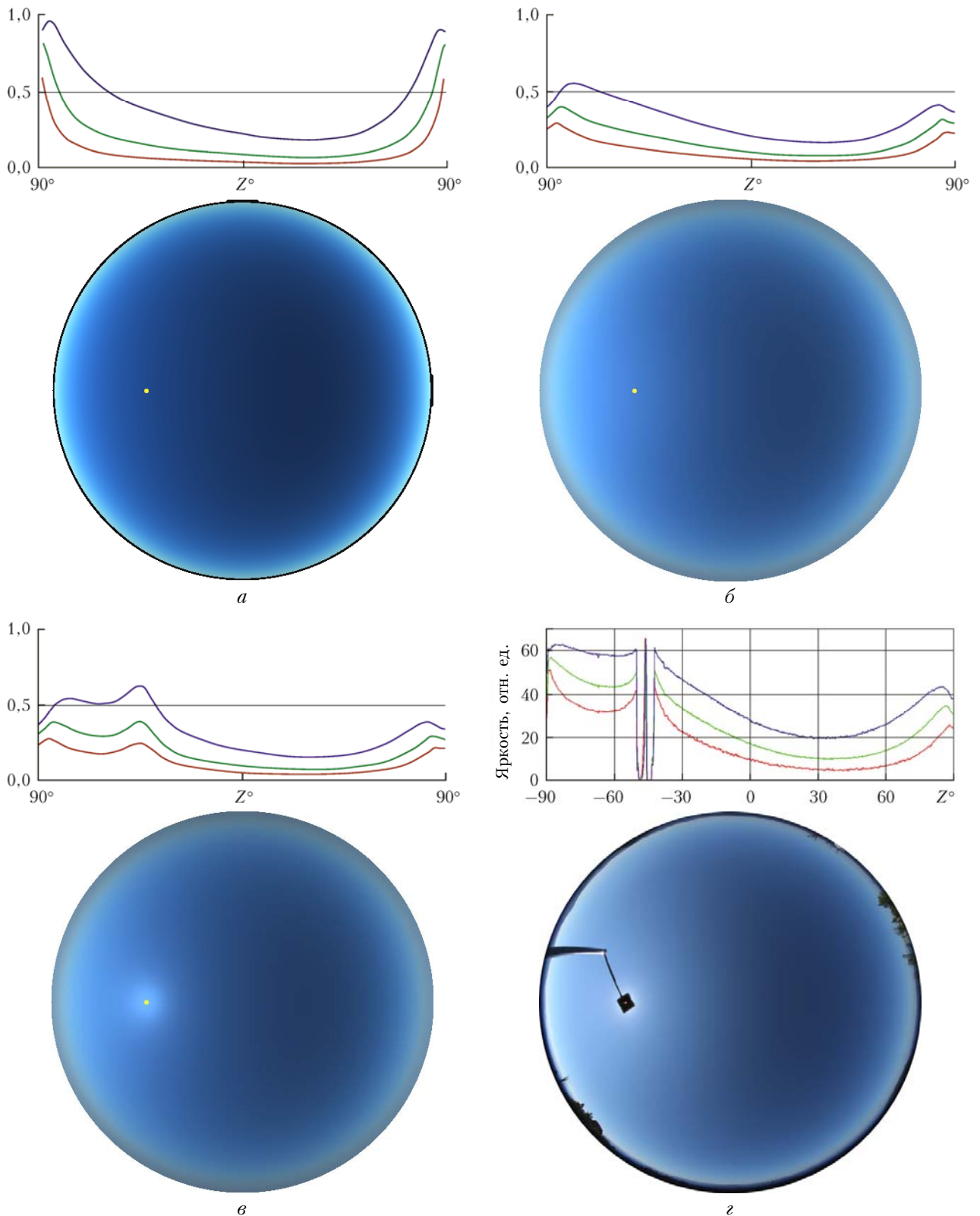


Рис. 3. Результат численного моделирования углового распределения яркости неба для наблюдателя на высоте 2000 м, для зенитного расстояния Солнца $Z_{\odot} = 45^{\circ}$ при различном содержании аэрозоля: *a* – чисто молекулярная атмосфера ($\alpha_0^{mol} = 0,012 \text{ км}^{-1}$, $H_0^{mol} = 8 \text{ км}$); *б* – атмосфера, включающая мелкодисперсную фракцию ($\alpha_0^{aer1} = 0,075 \text{ км}^{-1}$); *в* – атмосфера, включающая мелкодисперсную α_0^{aer1} и крупнодисперсную ($\alpha_0^{aer2} = 0,008 \text{ км}^{-1}$) фракции. Желтой точкой отмечено положение Солнца. Выше над изображениями приведены профили яркости неба в солнечном меридиане. Цвета линий соответствуют цветовым каналам R, G, B цветного цифрового изображения; *г* – изображение реального неба, полученное в горах на высоте 2 км при $Z_{\odot} = 45^{\circ}$

соте 2 км при $Z_{\odot} = 45^{\circ}$ в условиях высокой прозрачности. Для предотвращения ослепления фотокамеры прямым солнечным светом использовался полупрозрачный экран.

Вариация значений параметров моделей рассеяния позволяет проследить вклад каждого из них в механизм формирования распределения яркости по небосводу и произвести коррекцию параметров модели под реальное оптико-физическое состояние атмосферы. Сопоставление результатов численного моделирования с реальными изображениями, полученными с помощью Панорамного фотометрического комплекса [11, 12], позволит оценить оптическое состояние атмосферы.

Алгоритм вычисления поля яркости неба реализован в программе «AtModel», которая зарегистрирована в Государственном реестре программ для ЭВМ [13].

1. Журавлева Т.Б., Насретдинов И.М., Сакерин С.М. Численное моделирование угловой структуры яркости неба вблизи горизонта при наблюдении с Земли. Часть 1. Аэрозольная атмосфера // Оптика атмосфер. и океана. 2003. Т. 16, № 5–6. С. 537–545.
2. Hosek L., Wilkie A. An Analytic Model for Full Spectral Sky-Dome Radiance. ACM Transactions on Graphics (Proc. of ACM SIGGRAPH 2012). 2012. V. 31, N 4.
3. Галилейский В.П., Морозов А.М. Яркость атмосферы, наблюдаемая с поверхности планеты. Деп. ВИНТИ. № 1172–1387, 1987. 10 с.
4. Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. Теоретические основы атмосферной оптики. СПб.: Наука, 2003. 474 с.
5. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М.: Мир, 1971. 165 с.
6. Марчук Г.И., Михайлов Г.А. Результаты решения некоторых обратных задач атмосферной оптики методом Монте-Карло // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1967. Т. III, № 4. С. 394–401.
7. Креков Г.М., Рахимов Р.Ф. Оптико-локационная модель континентального аэрозоля. Новосибирск: Наука, 1982. 199 с.
8. Розенберг Г.В., Горчаков Г.И., Георгиевский Ю.С., Любовева Ю.С. Оптические параметры атмосферного аэрозоля // Физика атмосферы и проблемы климата. М.: Наука, 1980. С. 216–257.
9. Arvesen J.C. Solar spectral irradiance at the top of the atmosphere – UV to visible (200–2495 nm). NASA Ames Research Center.
10. Arvesen J.C., Griffin R.N., Jr., Pearson B.D., Jr. Determination of Extraterrestrial Solar Spectral Irradiance from a Research Aircraft // Appl. Opt. 1969. V. 8, N 11. P. 2215–2232.
11. Галилейский В.П., Морозов А.М., Ошлаков В.К. Панорамный фотометрический комплекс для контроля прямой и рассеянной солнечной радиации // Региональный мониторинг атмосферы. Ч. 2. Новые приборы и методики измерений / Под ред. М.В. Кабанова. Томск: Спектр, 1997. С. 146–160.
12. Выгон В.Г., Галилейский В.П., Зуев К.Г., Колеватов А.С., Морозов А.М., Петров А.И. Комплекс измерения астроклиматических и метеорологических параметров // 17-й Междунар. симпоз.: Тезисы докл. Томск, 2011.
13. Галилейский В.П., Зуев К.Г., Морозов А.М. Программа для ЭВМ «AtModel». Государственный реестр программ для ЭВМ, рег. № 2011614925 от 23.06.2011.

V.P. Galileyskii, A.I. Grishin, A.M. Morozov. Numerical simulation of angular distribution of the scattered solar radiation brightness in the Earth's atmosphere.

This paper considers the computational model to calculate the field of sky brightness in the atmosphere, caused by a single-scattered solar radiation in the visible range of the spectrum. The numerical simulation model of homogeneous layers of the atmosphere with altitude distribution coefficients of molecular and aerosol scattering and absorption is used. The calculation is performed in three spectral bands R, G, B, comparable to human vision and photographic recording.